

## Produção de biochar com palha de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*)

Biochar production with sugarcane straw (*Saccharum sp.*)

Producción de biocarbón con paja de caña de azúcar (*Saccharum sp.*)

Recebido: 13/12/2021 | Revisado: 17/12/2021 | Aceito: 30/12/2021 | Publicado: 07/01/2022

### Caroline Araújo Marques

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1638-7786>  
Universidade Federal de São Carlos, Brasil  
E-mail: caroline\_amarques@hotmail.com

### Diego Aleixo da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2552-7672>  
Universidade Federal de São Carlos, Brasil  
E-mail: diegoaleixo.florestal@gmail.com

### Marcos de Jesus Fonseca de Apresentação

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3333-3429>  
Universidade Federal de São Carlos, Brasil  
E-mail: nadafonseca@gmail.com

### Gabriela Tami Nakashima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7437-4521>  
Universidade Federal de São Carlos, Brasil  
E-mail: gabi.tami@gmail.com

### Fabio Minoru Yamaji

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0908-8163>  
Universidade Federal de São Carlos, Brasil  
E-mail: fmyamaji@ufscar.br

### Resumo

Na colheita mecanizada de cana-de-açúcar, espessas camadas de palha são depositadas sobre o solo dificultando a rebrota e a emergência de *Saccharum sp.* Faz-se necessário buscar alternativas para seu excedente, que pode ser destinado à produção de biochar, material rico em carbono e que atua como condicionador de solos e sequestrador de CO<sub>2</sub> da atmosfera. O objetivo foi produzir o biochar utilizando resíduos de palha de cana, analisando as melhores condições de produção e de desempenho. Foram realizadas pirólises em forno mufla para os tratamentos: T1: 200 °C, T2: 250 °C, T3: 300 °C e T4: 350 °C com tempo de residência de 2 horas. Realizou-se a análise imediata do biochar, com a determinação do teor de voláteis, o teor de cinzas, o carbono fixo e o rendimento gravimétrico. Por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram identificadas as estruturas morfológicas do material e com a Análise Termogravimétrica determinaram-se os mecanismos de degradação térmica. Os resultados foram 23,51% (T1) e 63,74 % (T4) para o carbono fixo e 85,01% (T1) e 28,11% (T4) para o rendimento gravimétrico do biochar. A partir do MEV observou-se maior presença de poros no biochar T2 e T3. O tratamento T2 apresentou o melhor equilíbrio entre o teor de carbono fixo e o rendimento gravimétrico, enquanto o T3 apresentou maior estabilidade térmica. Conclui-se que a faixa de temperatura que apresenta as melhores condições de produção e desempenho do biochar encontra-se entre 250 °C e 300 °C.

**Palavras-chave:** Biomassa; Bioenergia; Resíduo.

### Abstract

In the mechanized harvesting of sugarcane, thick layers of straw are deposited on the ground, hindering the regrowth and emergence of *Saccharum sp.* It is necessary to seek alternatives for its surplus, which can be used to produce biochar, material rich in carbon and which work as a soil conditioner and as a CO<sub>2</sub> scavenger in the atmosphere. The aim was to produce biochar using sugarcane straw residues, analyzing the best conditions for production and performance. Pyrolysis was carried out in a muffle oven for the treatments: T1: 200 °C, T2: 250 °C, T3: 300 °C and T4: 350 °C, residence time 2 hours. The proximate analysis of the biochar was carried out, with the determination of volatile matter, ash, fixed carbon and gravimetric yield. Through Scanning Electron Microscopy (SEM) the morphological structures of the material were identified and with the Thermogravimetric Analysis the mechanisms of thermal degradation were determined. The results were 23.51% (T1) and 63.74% (T4) for fixed carbon and 85.01% (T1) and 28.11% (T4) for the gravimetric yield of biochar. From the SEM it was observed a greater presence of pores in the biochar T2 and T3. Treatment T2 had the best balance between fixed carbon content and gravimetric yield, while the T3 showed greater thermal stability. It is concluded that the temperature range that presents the best conditions for production and performance of biochar is between 250 °C and 300 °C.

**Keywords:** Biomass; Bioenergy; Waste.

## Resumen

En la cosecha mecanizada de caña de azúcar, se depositan gruesas capas de paja en el suelo, lo que dificulta el rebrote y emergencia de *Saccharum sp.* Es necesario buscar alternativas para su excedente, que puede ser utilizado para la producción de biocarbón, un material rico en carbono y que actúa como acondicionador de suelos y secuestrador de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. El objetivo fue producir biocarbón utilizando residuos de paja de caña, analizando las mejores condiciones de producción y desempeño. Se realizó pirólisis en horno de mufla para los tratamientos: T1: 200 °C, T2: 250 °C, T3: 300 °C y T4: 350 °C con un tiempo de residencia de 2 horas. Se verificó análisis inmediato de biocarbón, con la determinación del contenido de volátiles, contenido de cenizas, carbono fijo y rendimiento gravimétrico. Mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se identificaron las estructuras morfológicas del material y con el Análisis Termogravimétrico se determinaron los mecanismos de degradación térmica. Los resultados fueron 23,51% (T1) y 63,74% (T4) para carbono fijo y 85,01% (T1) y 28,11% (T4) para el rendimiento gravimétrico de biocarbón. A partir del MEB se observó una mayor presencia de poros en los biochar T2 y T3. Tratamiento T2 tuvo el mejor equilibrio entre contenido de carbono fijo y rendimiento gravimétrico, mientras T3 tuvo la mayor estabilidad térmica. Se concluye que el rango de temperatura que presenta las mejores condiciones para la producción y desempeño del biocarbón está entre 250 °C y 300 °C.

**Palabras clave:** Biomasa; Bioenergía; Residuo.

## 1. Introdução

Em decorrência do desenvolvimento econômico e industrial no mundo, nota-se o aumento das ações antrópicas poluidoras aplicadas sobre a natureza e o uso excessivo dos recursos naturais. Estas ações geram impactos negativos ao meio ambiente e provocam severas alterações no clima, como a elevação da concentração dos gases do efeito estufa (GEE), sobretudo, do gás dióxido de carbono, agravando o aquecimento global (Camoto, 2013).

As emissões dos gases do efeito estufa são atribuídas ao setor energético, ao setor industrial e ao setor de transportes. São provenientes da queima de combustíveis fósseis, das atividades agrícolas, da pecuária extensiva e das mudanças advindas do uso da terra (IPCC, 2019). Atualmente, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera encontra-se em 416,17 partes por milhão (NOAA, 2021). As emissões associadas à matriz energética brasileira correspondem a 398,3 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (Ben, 2021).

No Brasil, o cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) possui considerável participação em termos de emissão dos gases poluentes. Atualmente, a cultura de cana abrange mais de oito milhões de hectares, tornando o país promissor no cenário mundial na produção de etanol, açúcar e seus subprodutos (CONAB, 2021). O sistema de colheita manual emprega o fogo para a queima prévia das palhas, promovendo a limpeza e facilitando o corte da vegetação, tornando a planta mais quebradiça, potencializando a capacidade de corte manual e reduzindo o tempo de colheita (Roseiro & Takayanagui, 2004; Ribeiro & Ficarelli, 2010).

A queima da palha nos canaviais provoca a emissão de poluentes na atmosfera, como o dióxido de carbono, o monóxido de carbono, o metano, o óxido nitroso e os gases responsáveis pela formação do ozônio, com significativa dispersão de material particulado no ar (Ronquim, 2010). Em 2002, devido à poluição atmosférica aprovou-se a Lei Estadual 11.241, que dispõe de um cronograma para a eliminação da queima da palha de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. É previsto que a queima prévia seja eliminada em 20% no primeiro ano a 100% até o ano de 2021 nas áreas mecanizáveis e até 2031 para as áreas não mecanizáveis (Paraiso & Gouveia, 2015).

Adequando-se à legislação ambiental, constata-se o aumento da mecanização da colheita, sem a queima prévia da palha, que é então depositada em uma espessa camada sobre o solo. Segundo a CONAB (2021), o estado de São Paulo apresenta índice de mecanização de 94,8% prevista para a safra de 2021/2022, enquanto o percentual de colheita manual em nível nacional está estimado em 11,9%. Os resíduos depositados protegem o solo contra a erosão e beneficiam a ciclagem de nutrientes, entretanto, o excesso da palhada pode dificultar o cultivo, o controle de plantas daninhas e a emergência da cana, ocasionando em falhas de sua rebrota (Souza et al., 2005; Carvalho, 2015).

Faz-se necessário buscar alternativas para o excedente da palha de cana, de forma a contribuir para o manejo da

cultura e mitigar os impactos ambientais. A palha de cana-de-açúcar é constituída por toda a parte aérea da cana: as folhas verdes, as folhas secas e o ponteiro, com exceção dos colmos utilizados pela indústria. Para cada tonelada de cana obtêm-se 140 kg de palha (Santos et al., 2012). É um resíduo largamente utilizado para a produção de etanol combustível, possuindo também grande potencial para a geração de calor e eletricidade (Canevazzi, 2021).

Porém, encontram-se desafios no aproveitamento da palha de cana na indústria quanto a otimização de seu recolhimento e transporte, bem como, dificuldades operacionais atreladas à sua composição química. Na geração de calor, os materiais inorgânicos e o alto teor de cinzas presentes na palha provocam incrustações e corrosões nas superfícies de troca térmica, inviabilizando a operação (Carvalho, 2015; Silva, 2013).

Como alternativa a biomassa pode ser destinada à produção de biochar (Souza et al., 2005). Entende-se por biocarvão todo produto rico em carbono obtido através da pirólise, processo no qual a biomassa é carbonizada em temperaturas relativamente baixas. O biochar distingue-se do carvão vegetal por sua finalidade, enquanto o carvão vegetal é empregado como combustível para aquecimento e para a produção de energia, o biochar é incorporado para melhorar as propriedades do solo e aumentar a produtividade dos plantios agrícolas e florestais (Lehmann & Joseph, 2009).

A produção e a utilização do biochar permitem o reaproveitamento dos resíduos de difícil descarte, como os resíduos da produção de papel e celulose, da produção madeireira e da agroindústria. Conseqüentemente, há a minimização dos passivos ambientais do setor produtivo, harmonizando a produção energética e alimentícia, com a fertilidade e o estoque de carbono no solo (Mangrich et al., 2011).

O uso do biochar auxilia na mitigação às mudanças climáticas, uma vez que é formado por estruturas carbonáceas de elevada estabilidade química, sofrendo decomposição em taxas mais lentas no ambiente. Desse modo, cria-se no solo um estoque de carbono a longo prazo, reduzindo a taxa de emissão de CO<sub>2</sub> do material para a atmosfera. Como condicionador de solos, o biochar atua melhorando as propriedades físicas, químicas e biológicas, elevando a fertilidade, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a eficiência no uso dos fertilizantes químicos (Teixeira et al, 2015; Petter et al., 2016; Viotto et al, 2017).

O desempenho do biochar como condicionador de solos e sequestrador de CO<sub>2</sub> da atmosfera é analisado a partir dos parâmetros que modificam sua estrutura, sua composição química e sua reatividade, como o material de origem, o tipo de processo térmico, a temperatura empregada na produção e o tempo de pirólise (Lehmann & Joseph, 2009; Petter et al., 2016). Portanto, o objetivo deste artigo foi produzir o biochar utilizando resíduos de palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) a partir da variação da temperatura de pirólise, e posteriormente, analisar as melhores condições de produção e de desempenho dentre as temperaturas propostas.

## 2. Metodologia

A matéria-prima utilizada no estudo foi a palha de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*), coletada na “Fazenda Corredeira” localizada no município de Ibaté, no estado de São Paulo (21.9547°S, 47.9967°W). A região encontra-se no bioma Cerrado e apresenta clima subtropical de inverno seco e verão quente (Cwa), segundo a classificação climática de Köppen, com precipitação média anual de 1501,6 mm (IBGE, 2021; Cepagri, 2016).

### 2.1 Produção do biochar

Baseou-se a produção dos biocarvões segundo a metodologia aplicada nas pesquisas de Pires et al. (2018). A palha de cana-de-açúcar foi inserida em cadinhos de porcelana, preenchendo os cadinhos até o volume completo (aproximadamente 7,5 g de material) e tampando-os a fim de reduzir a quantidade de oxigênio durante o processo de pirólise. Os cadinhos e as tampas de porcelana foram previamente calcinados a 600 °C por 30 minutos no forno mufla Jung, modelo LF0212 localizado no

Laboratório de Biomassa e Bioenergia da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.

Os cadinhos tampados foram inseridos na mufla permanecendo em seu interior durante 2 horas. Ao final da pirólise, foram obtidos os biocarvões de palha de cana-de-açúcar. O estudo consistiu em 4 tratamentos (T1 a T4) de acordo com a temperatura de pirólise empregada no processo. Foram realizadas 3 repetições por tratamento, totalizando 12 amostras (Tabela 1).

**Tabela 1.** Temperaturas de pirólise (°C) por tratamento.

Tratamentos	Temperatura de pirólise (°C)
T1	200
T2	250
T3	300
T4	350

Fonte: Autores (2021).

O rendimento gravimétrico foi determinado através da equação 1, com a aferição da massa inicial das partículas da palha de cana-de-açúcar seca e a massa final do biochar na balança analítica Shimadzu BL320H.

$$RG (\%) = \left( \frac{m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde: RG: percentual de rendimento gravimétrico (%); mi: massa inicial (g); mf: massa final após a pirólise (g).

## 2.2 Caracterização da biomassa

A umidade da palha de cana-de-açúcar foi determinada com base na norma ABNT NBR 8112 (1986) por meio da balança determinadora de umidade, marca A & D, modelo MX – 50.

Determinou-se o teor de voláteis com base na norma ASTM D1762 (1984), realizando o ensaio em triplicata. Os cadinhos utilizados na produção do biochar foram pesados em balança analítica, tampados e inseridos no forno mufla a 950 °C, primeiramente dispostos na borda externa durante 2 minutos com a porta da mufla aberta, em seguida, por 3 minutos na borda da mufla e por fim, dispostos em seu interior por 7 minutos com a porta da mufla fechada.

Após serem resfriados no dessecador, verificou-se novamente a pesagem do conjunto. O teor de voláteis foi obtido pela equação 2:

$$TMV (\%) = \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde: TMV: teor de materiais voláteis (%); mi: massa inicial, isenta de umidade (g); mf: massa final (g).

Com base na norma ASTM D1762 (1984), determinou-se o teor de cinzas com o ensaio em triplicata. Os cadinhos de porcelana utilizados para a determinação do teor de voláteis foram pesados e adicionados sem tampa em forno mufla à temperatura de 750 °C durante 6 horas. Ao final do ensaio, os cadinhos foram retirados da mufla, resfriados em dessecador e pesados novamente. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a equação 3:

$$TC (\%) = \left( \frac{m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde: TC: teor de cinzas (%); mi: massa inicial (g); mf: massa final (g).

Com base nos teores de voláteis e cinzas, calculou-se o teor de carbono fixo segundo a equação 4:

$$TCF (\%) = 100 - (TC + TMV) \quad (4)$$

Onde: TCF: teor de carbono fixo (%); TC: teor de cinzas (%); TMV: teor de materiais voláteis (%).

Através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram analisadas as estruturas morfológicas do biochar, das

cinzas da palha de cana-de-açúcar e dos tratamentos. Utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura Hitachi modelo TM-3000. As amostras preparadas mantiveram-se no dessecador até o início da análise, sendo inseridas em uma base de alumínio e fixadas em uma fita de carbono. O Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) permitiu obter as análises dos elementos presentes nas amostras.

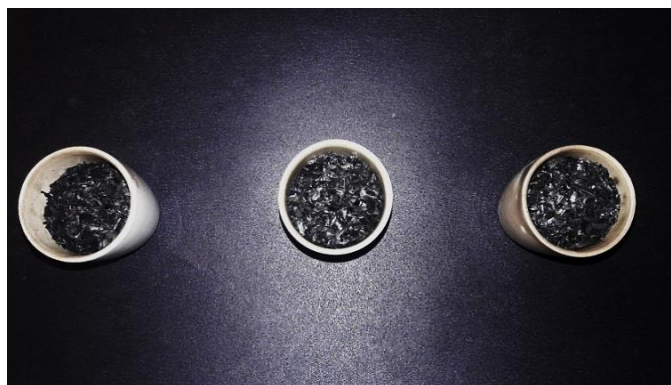
Para determinar os mecanismos de degradação térmica da matéria-prima e dos tratamentos, executou-se a análise termogravimétrica (TGA) no equipamento Pyris 1 TGA, marca Perkin Elmer. A análise foi realizada no intervalo de 30 °C a 700 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C. min<sup>-1</sup>, sob atmosfera de nitrogênio. A partir do ensaio foram gerados curvas TGA e DTG para a decomposição térmica dos materiais. Os dados foram submetidos às análises estatísticas ANOVA e Tukey com o auxílio do software RStudio (versão 3.0.1 2013).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Produção do Biochar

Por meio do experimento, foi possível produzir os biocarvões utilizando a palha de cana-de-açúcar para as temperaturas propostas, como demonstrado na Figura 1.

**Figura 1.** Amostras em triplicata dos biocarvões produzidos em forno mufla.



Fonte: Autores (2021).

#### 3.2 Caracterização da biomassa

A palha de cana-de-açúcar apresentou teor de umidade de 12,7%. Teores semelhantes foram alcançados nos trabalhos de Netto (2018), com umidade de 13,42%, para Menandro et al. (2013) com 9,2% de umidade para a palha composta por folhas secas e para Jacome (2014) com 8,8% de umidade. O teor para a palha é considerado inferior quando comparado ao teor de umidade do bagaço da cana, devido a palhada permanecer exposta ao sol após a colheita da cultura.

Com base na produção do biochar, foram calculados os teores de voláteis, cinzas, carbono fixo e o rendimento gravimétrico para os tratamentos, conforme a Tabela 2:

**Tabela 2.** Resultado da análise imediata para os tratamentos.

Tratamentos	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)	Rendimento Gravimétrico (%)
T1 – 200 °C	70,17 ± 0,31 a	6,33 ± 0,12 c	23,51 ± 0,42 c	85,01 ± 0,23 a
T2 – 250 °C	57,69 ± 1,06 b	8,42 ± 0,15 b	33,88 ± 1,14 b	67,36 ± 1,07 b
T3 – 300 °C	19,11 ± 0,63 c	17,86 ± 0,20 a	63,02 ± 0,54 a	30,44 ± 0,73 c
T4 – 350 °C	16,91 ± 2,32 c	19,34 ± 1,26 a	63,74 ± 1,36 a	28,11 ± 2,45 c

Fonte: Autores (2021).

Aplicou-se a análise de variância e o teste de Tukey, demonstrando que os tratamentos T3 e T4 não diferenciavam entre si, a um nível de confiança de 95% para os fatores avaliados. Isso indica uma vantagem em empregar o T3 uma vez que este tratamento consome menor energia na produção em comparação ao T4.

Por sua vez, o teor de material volátil decresceu com o aumento da temperatura de pirólise, apresentando tendência inversa ao teor de carbono fixo. Os materiais voláteis correspondem a fração da biomassa volatilizada durante o aquecimento, composta por gases e vapores orgânicos condensáveis (Rendeiro et al., 2008; Froehlich & Moura, 2014). Elevando-se a temperatura de carbonização, aumenta-se a liberação gasosa, resultando em um baixo teor de voláteis e por consequência, maior percentual de carbono fixo (Pinheiro & Sèye, 1998). Tendência semelhante foi encontrada nos estudos de Conz (2015) com biocarvões também produzidos com os resíduos da palha de cana-de-açúcar.

O teor de cinzas se comportou de maneira proporcional ao aumento da temperatura de pirólise. As cinzas são produtos da combustão dos componentes orgânicos e da oxidação dos materiais inorgânicos. São formadas por elementos em forma de sais ligadas à estrutura do carbono e na forma de partículas de minerais (Rendeiro et al., 2008; Van Loo & Koppejan, 2008). Dessa forma, o teor de cinzas está relacionado à presença de material inorgânico na amostra, devido a contaminação do resíduo depositado sobre o solo (Pires, 2017). Como a fração mineral se mantém constante na palha, o aumento do teor de cinzas, em percentual, ocorreu devido à redução do rendimento gravimétrico com o acréscimo da temperatura de pirólise. Tal tendência foi verificada em estudos realizados por Jeong et al., (2016) e Katyal et al., (2003) ao analisarem o efeito da temperatura no teor de cinzas em biocarvões produzidos com bagaço de cana-de-açúcar.

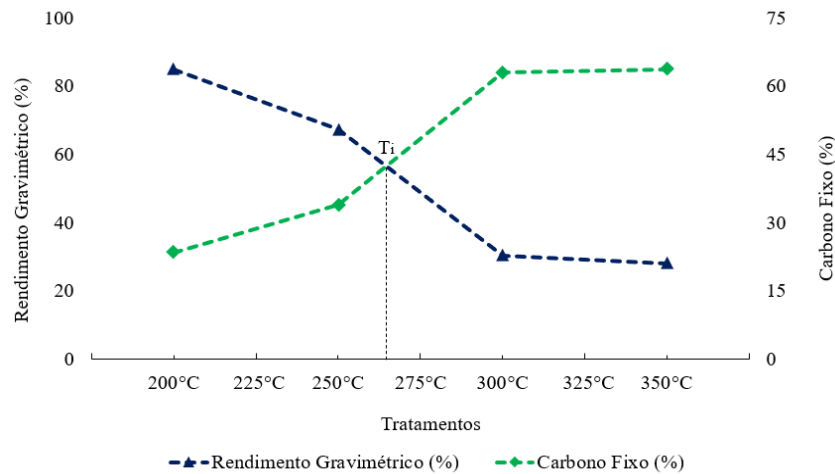
O teor de carbono fixo está relacionado à quantidade de carbono presente no biochar, comportando-se de modo proporcional ao aumento da temperatura de pirólise. A partir da elevação da temperatura, os compostos voláteis e condensáveis são liberados. Inicia-se com a perda de oxigênio e hidrogênio em forma de água e hidrocarbonetos, seguindo com a liberação dos gases não condensáveis como o monóxido e o dióxido de carbono (Maia, 2017).

O rendimento gravimétrico apresentou comportamento inversamente proporcional ao teor de carbono fixo, em decorrência da perda gradativa de substâncias químicas quando o material é aquecido (Da Róz et al., 2015). A carbonização ocorre em etapas, durante a primeira fase da pirólise, sob temperaturas de 120 °C a 300 °C há a formação de material parcialmente carbonizado, a perda de água e a perda dos compostos voláteis, como ácido acético, metanol, CO, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. A partir do aumento da temperatura iniciam-se as reações de degradação, entre 300 °C e 600 °C são formados o alcatrão, o metano, os compostos fenólicos originados da quebra da holocelulose e lignina, resultando no decréscimo da produção do carvão, ou seja, em estruturas com baixas razões O/C e H/C, conferindo ao carvão elevada estabilidade e resistência a degradação (Amonette & Joseph, 2009; Lopes, 2013).

Para se determinar as melhores condições de produção do biochar, faz-se necessário comparar os teores de carbono fixo e rendimentos gravimétricos, plotando os dados em um gráfico (Figura 2). A condição ideal encontra-se no ponto de intersecção das retas, visto que, procura-se obter os maiores rendimentos gravimétricos e carbono fixo possíveis.



**Figura 2.** Gráfico do teor de Carbono Fixo (%) e Rendimento Gravimétrico (%) em função dos tratamentos.

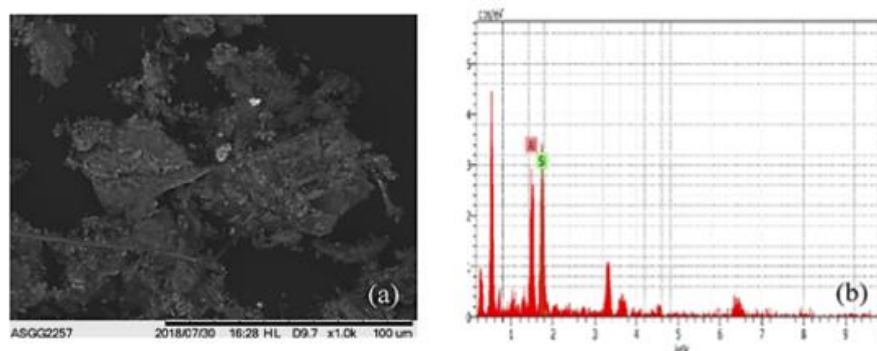


Fonte: Autores (2021).

Com base na Figura 2, foi possível determinar o tratamento adequado à produção do biochar. Traçou-se uma reta perpendicular ao eixo x no ponto de intersecção, encontrando o ponto Ti, temperatura ideal a 265 °C, temperatura próxima ao T2. Portanto, o tratamento no qual o biochar foi submetido à temperatura de 250 °C durante 2 horas apresentou o melhor equilíbrio entre o teor de carbono fixo e de rendimento de produção. O resultado corrobora com o encontrado por Pires et al., (2018), no qual determinaram a temperatura de 250 °C e tempo de residência de 3 horas em forno mufla a melhor condição de produção do biochar utilizando a palha de cana.

Através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi possível obter a imagem da estrutura das cinzas da palha de cana-de-açúcar com aumento de 1000 vezes. A composição química do material foi analisada utilizando o Espectrômetro de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS), como demonstrado na Figura 3:

**Figura 3.** (a) MEV para as cinzas da palha ampliado em 1000 vezes; (b) Análise obtida por EDS.



Fonte: Autores (2021).

Por meio da análise em EDS, os principais elementos encontrados nas cinzas da palha foram o alumínio e a sílica. A sílica foi identificada através do MEV como as incrustações mais claras em comparação ao restante do material.

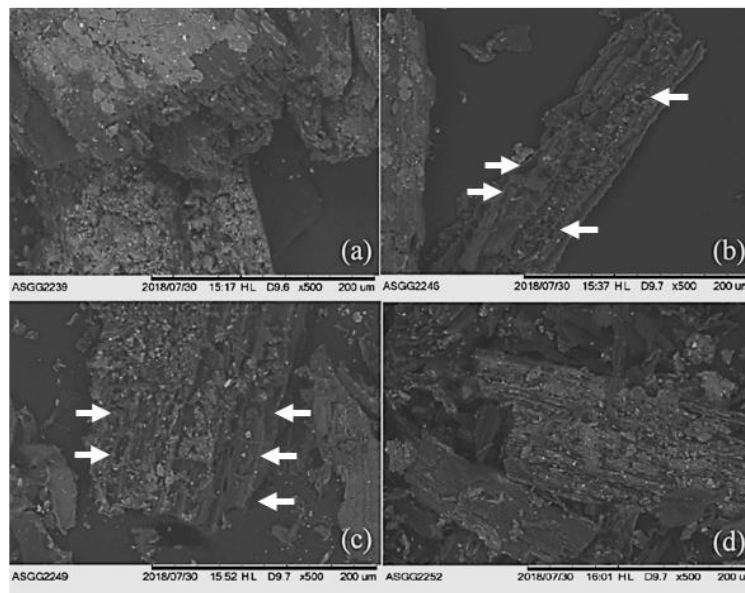
O silício (Si) trata-se de um elemento abundante na crosta terrestre, absorvido na forma de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) e acumulado como o ácido polimerizado (sílica amorfa) em áreas de máxima transpiração das plantas acumuladoras, como a cana-de-açúcar (Marafon, 2013). A sílica compõe a estrutura da palha, é encontrada principalmente nos tecidos de suporte do caule e das folhas em monocotiledôneas, estando associada à elevada produtividade da cana-de-açúcar

(Matchenkov & Calvert, 2002).

Porém, a elevada concentração de sílica na biomassa está relacionada às impurezas do material, devido a palha ser depositada diretamente no solo após a colheita da cana. Por sua vez, o alumínio é um elemento que em excesso pode causar toxicidade às plantas. Entretanto, estudos desenvolvidos por Junior et al. (2017) demonstram que aplicações de silício na cultura de cana atenuaram a toxicidade provocada pelo alumínio, melhorando a área foliar das plantas.

As estruturas dos biochars também foram analisadas em MEV para cada tratamento, obtendo imagens com aumento de 500 vezes (Figura 4):

**Figura 4.** MEV ampliado em 500 vezes: (a) T1; (b) T2; (c) T3; (d) T4.



Fonte: Autores (2021).

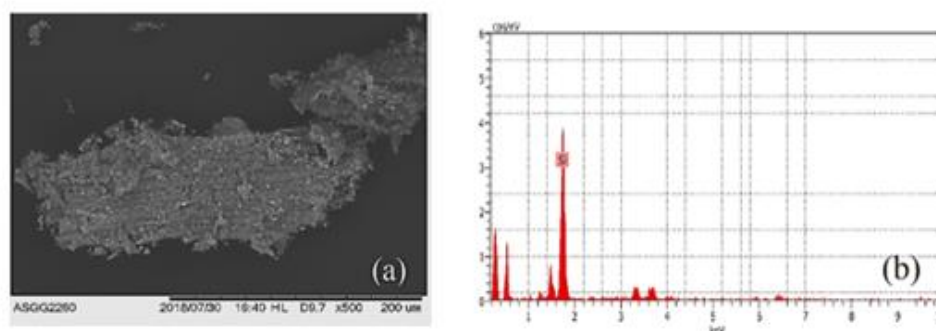
É possível observar que os biochars conservaram as estruturas originais da palha de cana-de-açúcar, apresentando também, poros em sua superfície, principalmente no T2 e T3, para as temperaturas de pirólise de 250 °C e 300 °C, respectivamente. A temperatura de pirólise influencia diretamente nas propriedades físicas do biochar.

À medida que a temperatura de pirólise aumenta, perde-se massa em forma de compostos voláteis, dessa forma, celulose, hemicelulose e lignina são degradadas formando compostos de alto teor de carbono, liberando os espaços porosos e formando macro, meso e microporos, os quais contribuem para o aumento da superfície específica do carvão (Downie et al., 2009; Petter et al., 2016). Os macroporos, com diâmetro aproximado de 1 mm são essenciais na retenção de água e para o crescimento das raízes no solo, enquanto os microporos fornecem um habitat para microrganismos e auxiliam a aeração do solo (Conz et al., 2015).

As cinzas do biochar foram analisadas em MEV, com aumento de 1000 vezes. Na Figura 5, observa-se a presença de sílica nas cinzas, identificadas como as incrustações mais claras no material.



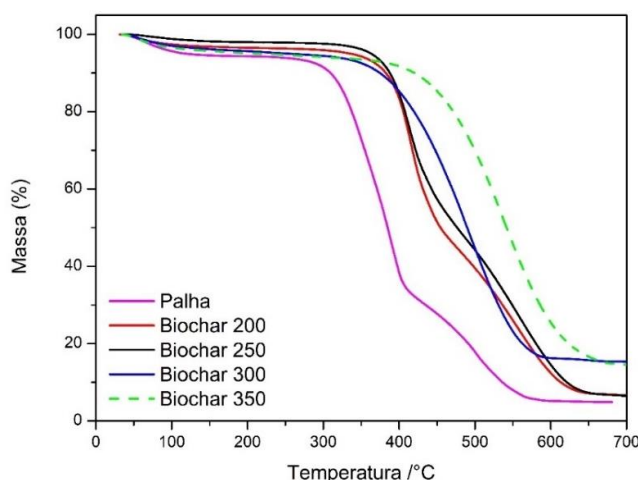
**Figura 5.** (a) Imagem de MEV para as cinzas do biochar ampliado 1000 vezes; (b) Análise obtida por EDS.



Fonte: Autores (2021).

Mediante a análise termogravimétrica, observou-se os eventos definidos da perda de massa (%) em função da temperatura (°C), para a palha de cana-de-açúcar e para os tratamentos de biochar, conforme o gráfico de TGA (Figura 6). A perda de massa corresponde inicialmente à liberação de água, seguida da degradação das hemiceluloses, celulosas e ligninas presentes na biomassa.

**Figura 6.** Gráfico TGA demonstrando a perda de massa em função da temperatura para a palha e para os tratamentos.

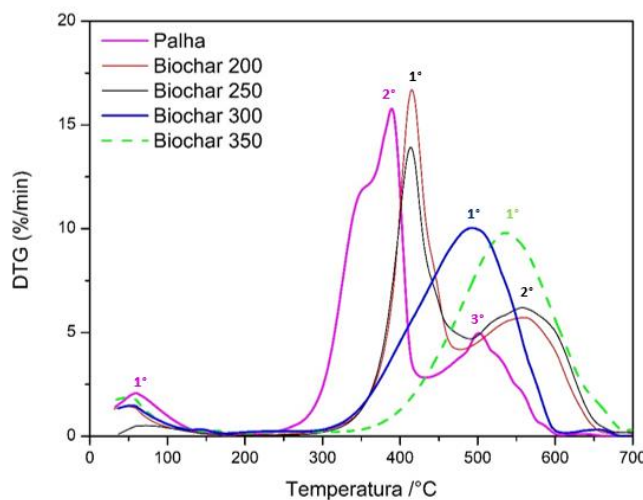


Fonte: Autores (2021).

Com base na curva DTG da Figura 7, foram observados três estágios de decomposição térmica para a palha de cana-de-açúcar. A primeira perda de massa sucedeu próximo a 100 °C com a evaporação da água. A segunda perda de massa ocorreu a 350 °C com a degradação das hemiceluloses e celulosas presentes no material, prosseguindo para a terceira perda de massa a 500 °C com a degradação da lignina.

T1 e T2 apresentaram dois estágios de decomposição térmica, pois ambos foram previamente submetidos a pirólise, já havendo a liberação de água e a degradação parcial das hemiceluloses durante a carbonização. Portanto, a primeira perda de massa ocorreu a 400 °C com a degradação das celulosas e a segunda perda de massa a 550 °C com a degradação das ligninas. Para T3 e T4 a degradação ocorreu entre as temperaturas de 500 °C a 550 °C, considerando que as hemiceluloses e as celulosas foram parcialmente degradadas durante a pirólise, havendo apenas a degradação das ligninas.

**Figura 7.** Gráfico DTG em função da temperatura para a palha e para os tratamentos.



Fonte: Autores (2021).

Portanto, ao analisar o gráfico DTG constata-se que T3 e T4 apresentam maior estabilidade térmica, devido à degradação parcial das hemiceluloses e celuloses, tornando-os mais estável em relação aos demais tratamentos. O comportamento analisado durante a decomposição térmica corrobora com o encontrado na literatura para a palha de cana. De acordo Higuchi et al. (2015), a primeira perda de massa está associada à perda de umidade e ocorre em temperaturas de 25 °C a 100 °C, seguida da perda de hemiceluloses (150 °C a 350 °C) e celuloses (275 °C a 350 °C), enquanto a lignina por apresentar maior estabilidade decompõe-se lentamente em uma faixa de 250 °C a 500 °C.

#### 4. Conclusão

A palha de cana-de-açúcar demonstrou elevado potencial como matéria-prima na produção de biochar, sendo possível produzi-lo nas quatro temperaturas propostas (T1: 200 °C, T2: 250 °C, T3: 300 °C, T4: 350 °C), fixando-se a pirólise em 2 horas. Analisando os resultados, o T2 apresentou o melhor equilíbrio entre o teor de carbono fixo – essencial para a fixação de carbono no solo – e o rendimento gravimétrico, garantindo que sua utilização seja viável.

Entretanto, com base na análise em TGA, T3 e T4 apresentaram maior estabilidade térmica, fundamental para o desempenho do biochar em campo. Considerando que estes tratamentos não apresentaram diferença significativa a um nível de confiança de 95%, T3 apresenta-se vantajoso por consumir menor energia em sua produção. Para estes resultados encontrados, conclui-se que a faixa de temperatura que apresenta as melhores condições de produção e desempenho do biochar encontra-se entre 250 °C e 300 °C.

Os biochars produzidos nestes tratamentos apresentaram porosidade que pode auxiliar na retenção de água no solo, no crescimento das raízes e oferecer habitats para os microrganismos do solo, atendendo a finalidade indicada na literatura. Propõe-se para trabalhos futuros a produção do biochar na temperatura ideal de 265 °C, submetendo-o também a faixa de temperatura de 250 °C a 300 °C, prosseguindo com a aplicação do biochar em campo e com a análise de seu desempenho no solo.

#### Referências

ABNT NBR 8112. (1986). *Carvão Vegetal – Análise Imediata: método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Amonette, F. E., & Joseph, S. (2009). Characteristic of biochar: Microchemical properties. In Lehmann, J., & Joseph, Biochar for Environmental Management: Science and Technology (33-43). Earthscan.

- ASTM D1762. (1984). *Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. West Conshohocken: ASTM International.
- BEN, Balanço Energético Nacional. (2021). *Relatório síntese 2021: Ano base 2020*. Empresa de Pesquisa Energética.
- Camoto, F. C. (2013). *Consumo energético nos setores industriais brasileiros – Uma avaliação de desempenho e estratégias para a redução da emissão de CO<sub>2</sub>*. (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Canevazzi, N. (2021). *A versatilidade da palha na cultura da cana-de-açúcar*. Coopercitrus. <http://www.coopercitrus.com.br/?pag=revista&p=matéria&codigo=6624>.
- Carvalho, D. J. (2015). *Geração de Bioeletricidade em Usina Sucroalcooleira Utilizando Bagaço, Palha de Cana e Sorgo Biomassa*. (Tese de Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- CEPAGRI, Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. (2016). *Clima dos Municípios Paulistas*. Unicamp. Recuperado 6 Ago, 2021 de <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas>.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. (2021). *Acompanhamento da safra brasileira – cana-de-açúcar: Safra 2021/22*. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento.
- Conz, R. F. (2015). *Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura*. (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- Da Róz, A. L., Ricardo, J. F. C., Nakashima, G. T., Santos, L. R. O., & Yamaji, F. M. (2015). Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19 (8), 810–814.
- Downie, A., Crosky, A., Munroe, P. Physical Properties of Biochar. (2009). In Lehmann, J., & Joseph, Biochar for Environmental Management: Science and Technology, (13-30). London: Earthscan.
- Froehlich, P. L., & Moura, A. B. D. (2014). Carvão vegetal: Propriedades físico-químicas e principais aplicações. *Tecnologia e Tendências*, 9, (1), 1-19.
- Higuchi, L. A., Rueda-Ordóñez, Y. J., & Tannous, K. (2015). Comparativo da cinética de decomposição térmica da palha de cana-de-açúcar em atmosfera oxidante e inerte. In *XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*. (p. 6). Campinas, SP.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021). *Ibaté*. Recuperado 20 Ago, 2021 de <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/ibate.html>.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land*. Recuperado 7 Mar, 2021 de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.SPM\\_Approved\\_Microsite\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf).
- Jacome, D. L. F. (2014). *Caracterização Físico-química das Cinzas de Palha de Cana-de-Açúcar Através de Análises Térmicas Simultâneas (STA)*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Jeong, C. Y., Dodla, S. K., & Wang, J. J. (2016). Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products. *Chemosphere*, 142, 4-13.
- Junior, G. S. S., Júnior, D. C. F., Chiconato, D. A., Alves, R. C., & Santos, D. M. M. (2017). Silício atenua toxicidade do alumínio em plantas jovens de cana-de-açúcar: Teores de clorofilas e crescimento foliar. *Holos Environment*, 17.
- Katyal, S., Thambimuthu, K., & Valix, M. (2003). Carbonization of bagasse in a fixed bed reactor: Influence of process variables on char yield and characteristics. *Renewable Energy*, 28, 713-725.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for Environmental Management: An Introduction. In Lehmann, J., & Joseph, Biochar for Environmental Management: Science and Technology, (1-9): Earthscan.
- Lopes, H. M. (2013). *Caracterização química e física de biocarvão de lodo de esgoto sob diferentes temperaturas de pirólise*. (Monografia de Graduação). Universidade de Brasília, Brasília.
- Maia, A. A. D. (2017). *A biomassa Capsicum spp. como fonte de bioenergia e adsorção de metais*. (Tese de Doutorado). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Sorocaba.
- Mangrich, A. S., Maia, C. M. B. F., & Novotny, E. H. (2011). Biocarvão: As terras pretas de índios e o sequestro de carbono, *Revista Ciência Hoje*, 47 (281), 49-52.
- Marafon, A. C. (2013). *Benefícios do silício para a cana-de-açúcar*. Portal dia de Campo. <http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=28849&secao=Agrotemas>.
- Matchenkov, V. V., & Calvert, D. V. (2002). Silicon as beneficial element for sugarcane. *Journal American Society of Sugarcane Technologists*, 22, 21-30.
- Menandro, L. M. S., Franco, H. C. J., Pimenta, M. T. B., Carvalho, J. L. N., Vitti, A. C., Magalhães, P. S. G., Kölln, O. T., Neto, J. R. (2013). Palha de cana-de-açúcar: Possibilidades distintas para o campo e para indústria. In *VII Workshop Agroenergia*. (p. 7).
- Netto, C. F. (2018). *Análise de viabilidade técnica e econômica do recolhimento de palha de cana-de-açúcar por forrageira e colheita integral*. (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). *Base de dados*. Global Monitoring Laboratory. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>.

- Paraíso, M. L. S., & Gouveia, N. (2015). Riscos à saúde devido à queima prévia da palha de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, 18 (3), 691-701.
- Petter, F. A., Lima, L. B., Morales, M. M., Marimon Júnior, B. H. M., & Morais, L. A. (2016). Biocarvão no solo: Aspectos agrônômicos e ambientais. In *Simpósio Brasileiro de Agropecuária Sustentável*. (p. 9). Sinop, MT.
- Pinheiro, P. C. C., & Sêye, O. (1998). Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de Eucalyptus. In *Congresso Anual da ABM*. (p. 2032).
- Pires, I. C. S. A. (2017). *Produção e caracterização de biochar de palha de cana-de-açúcar (Saccharum sp.)*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba.
- Pires, I. C. S. A., Nakashima, G. T., Padilla, E. R. D., Santos, L. R. O., Varanda, L. D., Alesi, L. S., & Yamaji, F. M. (2018). Biochar de palha de cana-de-açúcar: Caracterização e estudo do processo. *Revista Virtual de Química*, 10 (4).
- Rendeiro, G., Nogueira, M. F. M., Brasil, A. C. M., Cruz, D. O. A., Guerra, D. R. S., Macêdo, E. N., & Ichihara, J. A. (2018). *Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia*. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- Ribeiro, H., & Ficarelli, T. R. A. (2010). Queimadas nos canaviais e perspectivas dos cortadores de cana-de-açúcar em Macatuba, São Paulo. *Saúde e Sociedade*, 19 (1), 48-63.
- Ronquim, C. C. (2010). *Queimada na colheita de cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite.
- Roseiro, M. N. V., & Takayanagui, A. M. M. (2004). Meio ambiente e poluição atmosférica: o caso da cana-de-açúcar. *Saúde*, 30 (2), 76-83.
- Santos, F. A., Queiróz, J. H., Colodette, J. L., Fernandes, S. A., Guimarães, V. M., & Rezende, S. T. (2012). Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova*, 35 (5), 1004-1010.
- Silva, M. C. P., Teixeira, D. G. C., & Pontes, L. A. M. (2013). A queima da palha de cana-de-açúcar: o impacto ambiental e as novas tecnologias para produção de etanol de segunda geração. In *8º Congresso Internacional de Bioenergia*. (p. 6). São Paulo, SP.
- Souza, Z. M., Paixão, A. C. S., Prado, R. M., Cesarin, L. G., & Souza, S. R. (2005). Manejo de palhada de cana colhida sem queima, produtividade do canavial e qualidade do caldo. *Ciência Rural*, 35 (5), 1062-1068.
- Teixeira, W., Maia, C., Carvalho, M., & Rezende, F. (2015). *Potencialidades do uso do biocarvão como condicionador de solo no Brasil*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Van Loo, S., & Koppejan, J. (2008). *The handbook of biomass combustion and cofiring*. Earthscan.
- Viotto, R. S., Maia, A. A., Yamaji, F. M., & Morais, L. C. (2017). Thermogravimetric investigation of spent shiitake substrate to solid biofuel. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 96 (4), 845-854.